

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
28 octobre 2004 (28.10.2004)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2004/093094 A2

(51) Classification internationale des brevets⁷ : G21C 3/28

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2004/050148

(22) Date de dépôt international : 7 avril 2004 (07.04.2004)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0304434 9 avril 2003 (09.04.2003) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : COM-
MISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE [FR/FR];
31-33 rue de la Fédération, F-75752 PARIS 15ème (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : BAL-
LAGNY, Alain [FR/FR]; 21 rue de Roussigny, F-91470
LES MOLIERES (FR). LLORCA, Nùria [FR/FR]; 27,
avenue de l'Obélisque, F-91770 SAINT VRAIN (FR).

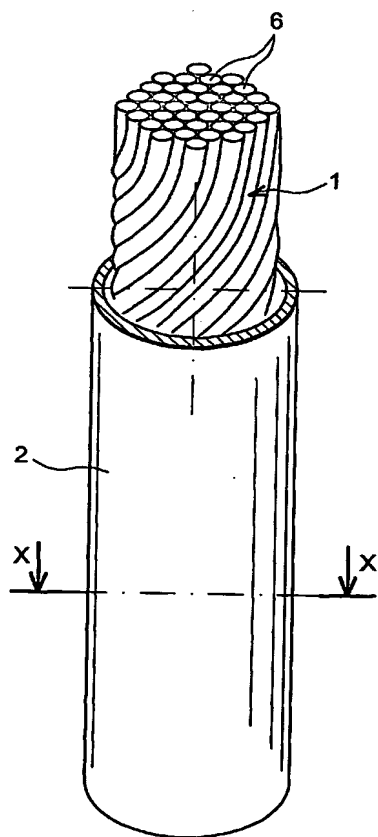
(74) Mandataire : POULIN, Gérard; BREVATOME, 3, rue
du Docteur Lancereaux, F-75008 PARIS (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT,
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO,
CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG,
KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG,
MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH,
PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: SINGLE PLAITING NUCLEAR FUEL AND METHOD FOR THE PRODUCTION THEREOF

(54) Titre : COMBUSTIBLE NUCLEAIRE A FILS TRESSÉS ET SON PROCÉDE DE REALISATION



(57) Abstract: The invention relates to a nuclear fuel with a high density of fissile material in the form of an assembly (1) of elementary threads, whereby the major part thereof consists of fissile material, whereby said threads are assembled by stranding, plaiting or weaving, whereby said assembly is contained in a non-oxidizing, ductile wrapper (2). The elementary threads are compressed by deformation of the wrapper (2) and the elementary threads made of fissile material are sufficiently fine in order to enable dimensional accommodation of the fuel with an irradiation effect during nuclear combustion and removal of gaseous fission products. The invention also relates to a method for producing said nuclear fuel.

(57) Abrégé : L'invention concerne un combustible nucléaire à densité élevée de matière fissile qui se présente sous la forme d'un assemblage (1) de fils élémentaires, dont la majeure partie est constituée de matière fissile, lesdits fils étant assemblés par toronage, tressage ou tissage et ledit assemblage étant contenu dans une enveloppe (2) inoxydable et ductile, ces fils élémentaires étant comprimés par déformation de ladite enveloppe (2), et les fils élémentaires de matière fissile étant suffisamment fins pour permettre l'accommodation dimensionnelle du combustible aux effets de l'irradiation lors de la combustion nucléaire et l'évacuation des produits de fission gazeux. L'invention concerne également un procédé de réalisation dudit combustible nucléaire.



(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport*

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

**COMBUSTIBLE NUCLEAIRE A FILS TRESSES
ET SON PROCEDE DE REALISATION**

DESCRIPTION

5

DOMAINE TECHNIQUE

L'invention concerne un combustible nucléaire à haute densité de matière fissile et son procédé de réalisation.

10

ETAT DE LA TECHNIQUE ANTERIEURE

Les performances des réacteurs expérimentaux pour atteindre des flux de neutrons élevés découlent directement des performances des combustibles. Or celles-ci sont limitées par les quantités de matières fissiles pouvant être contenues dans les combustibles, et notamment par leur densité en matière fissile et leur homogénéité qui doivent être les plus élevées possibles ; elle sont également limitées par leur aptitude à pouvoir échanger facilement la chaleur produite au cours de la fission avec le réfrigérant du circuit primaire, et ceci sans atteindre des températures excessives susceptibles d'endommager les combustibles. Enfin, l'évacuation des produits de fission gazeux doit être assurée.

On quantifiera dans ce qui suit la densité de matière fissile en grammes par cm^3 . Lorsque la matière fissile est de l'uranium, l'unité s'écrit gU/cm^3 , c'est-à-dire gramme d'uranium par cm^3 .

Les réacteurs expérimentaux utilisent essentiellement des combustibles à plaques, mais également des combustibles cruciformes.

Les plaques des combustibles à plaques sont
5 fabriquées par colaminage d'un mélange de poudres de matière fissile (uranium, plutonium, américium ou leurs alliages) et d'un métal ductile comme par exemple l'aluminium, le zirconium ou le cuivre. En pratique, ils sont le plus souvent composés d'un alliage
10 d'uranium (par exemple : UAl ou UMo qui sont ductiles, U_3Si_2 , ...) et de poudre d'aluminium entre deux plaques d'aluminium. Lorsque l'alliage n'est pas ductile, comme c'est le cas de U_3Si_2 , il devient nécessaire d'augmenter l'apport de poudre de métal ductile. Ce procédé a fait
15 l'objet de nombreux développements pour augmenter la densité en uranium du combustible (voir le document [1]), ce paramètre étant considéré comme fondamental pour les performances des réacteurs. Toutefois, avec cette méthode, il n'est pas possible de laminier des
20 mélanges ayant plus de 50% en volume d'alliage d'uranium. Par exemple, pour un combustible à plaques fabriqué par colaminage d'un mélange de poudres d'uranium et d'aluminium, il n'est pas possible d'augmenter significativement la charge en matières
25 fissiles puisque le procédé implique que l'uranium soit mélangé avec au minimum 50% en volume de particules d'aluminium pour obtenir la ductilité requise. De plus, l'emploi de l'aluminium limite la température maximale admissible à environ 150°C pour éviter toute corrosion.
30 L'augmentation de la densité d'uranium a donc été réalisée essentiellement en recherchant des alliages

ayant une forte teneur en uranium. Ainsi, les réacteurs ont utilisé successivement des alliages UAl , UO_2 , U_3Si_2 et maintenant UMo permettant d'espérer atteindre respectivement des densités de 2 gU/cm^3 , 2 gU/cm^3 , 6 gU/cm^3 et pour l' UMo 8 gU/cm^3 . Ces valeurs correspondent à des valeurs théoriques dans des conditions idéales, pondérées par un certain coefficient tenant compte des imperfections de réalisation. Pour les trois premiers alliages, assez bien connus des industriels, ces valeurs pondérées correspondent aux valeurs effectivement obtenues. Mais elles en diffèrent pour un alliage plus récent comme l' UMo : la valeur théorique dans des conditions idéales est de 14 à 15 gU/cm^3 , la valeur pondérée par le coefficient tenant compte des imperfections de réalisation connu devrait se situer autour de 8 gU/cm^3 , mais la valeur obtenue en pratique est comprise entre 2 et $2,5 \text{ gU/cm}^3$.

Les combustibles cruciformes (voir le document [2]) sont quant à eux fabriqués par frittage d'un mélange de poudres d'uranium, d'oxyde d'uranium (UO_2) et d'autres constituants dont essentiellement le cuivre qui apporte la ductilité requise. L'ensemble est sous forme de poudres, mélangées de manière la plus homogène possible, et ensuite placées à l'intérieur d'un tube en acier inoxydable ductile. Une fois rempli, ce tube est ensuite déformé par passages successifs sur des galets jusqu'à ce qu'il atteigne la forme de croix voulue. Puis il est coupé à la longueur adéquate pour constituer la gaine.

Pour les combustibles cruciformes, la forme en croix permet un très bon échange avec le caloporteur

et l'emploi d'acier inoxydable comme gainage rend ces combustibles peu sensibles à une augmentation de la température. Ces combustibles sont donc potentiellement de très bons candidats pour l'augmentation des performances des réacteurs expérimentaux, à condition de pouvoir augmenter leur densité en uranium. Typiquement, ces combustibles sont constitués d'un mélange de poudre d'U, UO_2 et de poudre de cuivre, et leur densité en matière fissile n'est que de 2 gU/cm^3 . En remplaçant la poudre d' UO_2 par de la poudre d'UMo et en augmentant la proportion d'UMo, on pourrait atteindre une densité théorique pondérée de 8 à 10 gU/cm^3 . Mais en pratique, la réalisation du document [2] n'obtient que des valeurs de l'ordre de 2,2 à $2,5 \text{ gU/cm}^3$. Il semble cependant difficile d'aller au-delà de ces valeurs en utilisant la technologie des poudres.

La présente invention est issue de réflexions concernant l'augmentation de la densité des combustibles destinés aux réacteurs expérimentaux. On a déduit de l'art antérieur que le combustible idéal en termes de performances et de tenue sous irradiation devrait avoir les caractéristiques suivantes :

- une densité (théorique) d'environ $14 \text{ à } 15 \text{ gU/cm}^3$,
- des grains d'uranium ou d'alliage d'uranium d'environ 50 à 150 micromètres et entourés d'un matériau d'addition afin d'améliorer la conductibilité thermique et de limiter le gonflement sous irradiation,
- une porosité du combustible de quelques pourcents, uniformément répartie pour évacuer les gaz de fission.

En pratique, les combustibles en plaque ne semblent

guère pouvoir dépasser significativement les 6 gU/cm³, et les combustibles cruciformes sont limités à environ un tiers de cette valeur.

5 EXPOSÉ DE L'INVENTION

Le but de l'invention est de fournir un combustible nucléaire de forte densité de matière fissile, possédant en outre un bon comportement sous irradiation et une bonne évacuation des produits de fission gazeux. Par « bon comportement sous irradiation », on entend notamment une bonne stabilité dimensionnelle et un bon transfert thermique.

Ce but est atteint par un combustible nucléaire à densité élevée de matière fissile, caractérisé en ce qu'il se présente sous la forme d'un assemblage de fils élémentaires, dont la majeure partie est constituée de matière fissile, lesdits fils étant assemblés par toronage, tressage ou tissage et ledit assemblage étant contenu dans une enveloppe inoxydable et ductile, ces fils élémentaires étant comprimés par déformation de ladite enveloppe, et les fils élémentaires de matière fissile étant suffisamment fins pour permettre l'accommodation dimensionnelle du combustible aux effets de l'irradiation lors de la combustion nucléaire et l'évacuation des produits de fission gazeux.

Avantageusement, la déformation de l'enveloppe est réalisée jusqu'à ce que les espaces libres entre les fils élémentaires n'occupent que 3 à 15% de la section interne de l'enveloppe après déformation.

En d'autres termes, les caractéristiques de forte densité de matière fissile, de bon comportement sous irradiation et de bonne évacuation des produits de fission gazeux sont obtenues en façonnant le matériau fissile en fils élémentaires fins, ces fils étant éventuellement associés à des fils élémentaires en un autre métal améliorant la ductilité ou le comportement sous irradiation, l'ensemble de ces fils élémentaires étant assemblé par tressage ou toronnage, et entouré d'une enveloppe en métal ductile inoxydable (jouant le rôle de gaine) qui a été déformée de manière à ce que les fibres élémentaires soient tassées et légèrement déformées, et ne conservent entre elles qu'une faible quantité d'espace libre. Les éléments ainsi réalisés sont des éléments de combustible nucléaire, appelés « crayons » lorsque l'enveloppe en métal ductile est un tube. L'invention visant à augmenter la densité du combustible en matière fissile, la majorité des fils élémentaires est en matière fissile.

Notons que le diamètre des fils élémentaires et leur tassement dans la gaine ductile inoxydable sont choisis de manière à ce que le combustible s'accommode bien des effets de l'irradiation lors de la combustion nucléaire, et à ce que les produits de fission gazeux s'évacuent aisément.

Selon un mode de réalisation particulier, la déformation de l'enveloppe est réalisée de sorte que la section des fils élémentaires soit déformée, et que les sections de deux fibres successives s'adaptent l'une à l'autre.

Avantageusement, la matière fissile est choisie parmi le groupe comprenant l'uranium, le plutonium, l'américium, leurs alliages ou une association de plusieurs de ces éléments.

5 Avantageusement, lesdits alliages sont choisis parmi le groupe comprenant UMo et UAl.

De préférence, la matière fissile est un alliage d'UMo comportant autour de 8% en masse de molybdène.

10 On note que le métal ductile et inoxydable de l'enveloppe est préférentiellement de l'acier inoxydable 316 L ou 316 LN.

 Des alliages comme UO_2 ou U_3Si_2 , couramment utilisés sous forme de poudres, ne sont pas utilisables
15 pour réaliser l'invention en raison de leur manque de ductilité qui interdit la réalisation de fils.

 Préférentiellement, les fils élémentaires ont un diamètre compris entre $10\mu\text{m}$ et $100\mu\text{m}$, leur section initiale étant circulaire. Toutefois ils sont
20 tassés par rétrécissement du volume intérieur de la gaine (laminage, galetage) après remplissage par l'assemblage « tressé ». Ce tassement est prévu pour optimiser la densité de combustible, mais aussi favoriser les transferts thermiques, l'accommodation
25 dimensionnelle sous irradiation et l'évacuation des produits de fission gazeux. Ce tassement produit un léger écrasement des fibres, rendant leur section légèrement polygonale, ce qui améliore significativement les transferts thermiques. Plus
30 précisément, on entend par légèrement polygonale le fait que deux surface convexes pressées l'une contre

l'autre présentent localement des déformations tendant à les aplanir et à les adapter précisément l'une à l'autre. On peut quantifier ce tassement par le pourcentage de vide existant dans une section transversale, qui est de l'ordre de 3 à 15%, et
5 préférentiellement voisin de 10%.

Selon un mode de réalisation particulier, l'assemblage de fils élémentaires est composé uniquement de fils de même composition.

10 Selon un autre mode de réalisation, l'assemblage de fils élémentaires est composé de fils de compositions différentes.

En d'autres termes, les fils élémentaires peuvent être tous composés de matière fissile, mais ils
15 peuvent également être associés à des fils élémentaires en un autre métal améliorant la ductilité ou le comportement sous irradiation du combustible nucléaire.

De façon préférentielle, l'assemblage de fils élémentaires comporte entre 60% et 90% en volume
20 de fils d'UMo, de 3 à 15% d'espaces vides et le reste en fils d'autres matériaux. En d'autres termes, selon une section transversale, de 60% à 90% de la surface intérieure de l'enveloppe est occupé par des fils d'alliage UMo, de 3 à 15% par des espaces vides et le
25 reste en fils d'autres matériaux. Dans le cas particulier où ce pourcentage atteint 90%, et où les espaces vides représentent 10% de la section, la totalité des fils utilisés est réalisée en UMo.

Selon un premier cas particulier, les fils
30 ont des diamètres identiques.

Selon un deuxième cas particulier, les fils ont des diamètres différents.

Avantageusement, l'assemblage de fils élémentaires a la forme d'une tresse.

5 Selon une variante, l'assemblage de fils élémentaires a la forme d'un toron. Avantageusement, le toron est un toron composé dépourvu de toron central.

Selon une variante, l'assemblage de fils élémentaires est tissé.

10 L'intérêt de façonner ces métaux en fils est de pouvoir bénéficier des avantages du métal en général (densité, conductibilité thermique, facilité de mise en forme...) sans avoir les inconvénients du métal à l'état massif sous forme de pastilles ou de barreaux
15 (gonflement sous irradiation...). On sait en effet que le gonflement sous irradiation des alliages d'uranium est notamment lié à l'impossibilité pour les gaz de fission de migrer vers l'épaisseur de la pastille ou du barreau alors que dans une conception à fils, si ceux-ci sont
20 suffisamment fins, les produits de fissions peuvent atteindre la surface des fils et migrer dans l'espace entre fils qui autorise une évacuation plus directe et plus rapide que dans un matériau poreux. On évite également les inconvénients des poudres ou objets
25 fabriqués à partir de poudres : nécessité d'une certaine ductilité nécessitant des ajouts importants de matière non fissile, manque d'homogénéité finale.

L'existence d'un grand nombre de fils élémentaires facilite la réalisation d'assemblages
30 réguliers et fonctionnellement homogènes de divers composants (combustibles mixtes) ou de modifier les

propriétés du combustible lui-même en ajoutant dans l'assemblage des fils de métaux d'addition améliorant la ductilité ou le comportement sous irradiation. On a ainsi la possibilité de mélanger de façon organisée et
5 maîtrisée des fils de natures différentes, dès lors qu'ils sont dans un état métallurgique qui permet la mise en œuvre d'un assemblage dit « tressé », qui désignera dans ce qui suit aussi bien un assemblage tressé au sens propre qu'un assemblage obtenu par
10 toronnage simple ou composé.

Lorsque l'assemblage est obtenu par toronage, il est avantageux de ne pas placer de toron central selon la ligne neutre de l'assemblage pour conserver l'homogénéité de cet assemblage et faciliter
15 son accommodation dimensionnelle aux effets de l'irradiation lors de la combustion nucléaire.

Un autre avantage de l'invention réside dans la forme continue des espaces vides, en microcanaux entre les fibres élémentaires, qui favorise
20 l'évacuation rapide des produits de fission gazeux. Selon l'art antérieur, la porosité permettait une certaine évacuation, mais la communication des micro espaces vides successifs était beaucoup plus aléatoire et moins directe. Cette évacuation est encore facilitée
25 lorsqu'il n'y a pas de toron central.

La présente invention couvre également toute assemblage de crayons de combustible nucléaire décrits précédemment.

Un autre objet de l'invention réside dans le procédé de réalisation du combustible nucléaire décrit ci-dessus. Ce procédé comporte les étapes suivantes :

- 5 - réalisation de fils élémentaires de composition déterminée, dont la majeure partie sont des fils de matière fissile,
- réalisation d'au moins un assemblage à l'aide desdits fils,
- 10 - placement de l'assemblage dans une enveloppe inoxydable et ductile,
- mise en forme dudit tube rempli.

De manière préférentielle, les étapes du procédé sont les suivantes :

- 15 a) façonnage du matériau fissile en fils fins et régulier,
- b) de manière facultative, façonnage de fils en un ou plusieurs autres matériaux améliorant la ductilité ou les caractéristiques sous irradiation du combustible
- 20 final,
- c) dans le cas où l'étape b) existe, réalisation du mélange homogène des fils issus de cette étape b) aux fils de matériau fissile issus de l'étape a)
- d) assemblage des fils
- 25 e) insertion d'un ou plusieurs assemblages issu de l'étape d) dans une enveloppe en métal inoxydable et ductile, en préservant l'homogénéité et la régularité de l'assemblage
- f) mise en forme de l'enveloppe.

- 30 De préférence, la mise en forme de l'enveloppe ductile inoxydable est faite de manière à

produire un léger écrasement des fibres et à ne laisser comme espace vide que 3% à 15% de la section transversale délimitée par la surface intérieure de l'enveloppe.

5 On peut si besoin effectuer le sectionnement de l'enveloppe remplie à la longueur requise pour chaque installation nucléaire utilisatrice du combustible, et le cas échéant l'insérer dans une seconde enveloppe requise par cette installation
10 nucléaire.

Selon un mode de réalisation particulier, l'enveloppe est un tube, il n'y a qu'un seul assemblage dans l'enveloppe et la mise en forme s'effectue par étirage à travers une filière ou par laminage.

15 Selon un autre mode de réalisation, l'enveloppe est un tube, il n'y a qu'un seul assemblage et la mise en forme s'effectue par galetage.

20 Selon un autre mode de réalisation, l'enveloppe est aplatie et contient plusieurs assemblages placés parallèlement les uns contre les autres de manière homogène, et la mise en forme de cette enveloppe ainsi remplie s'effectue par pressage ou laminage.

25 Tout procédé d'élaboration des fils convient pour la mise en œuvre de l'invention, notamment ceux qui permettent d'obtenir des fils homogènes de 10 à 100 μm avec les métaux déjà spécifiés. Nous avons utilisé le procédé du plateau
30 tournant (voir le document [3]) optimisé pour les caractéristiques physiques propres à l'alliage utilisé.

Ce procédé est basé sur la projection sur un disque tournant d'un jet d'alliage fondu. Par ce procédé, les fils ont un diamètre et une composition chimique contrôlée. Son application à la réalisation de fils
5 d'UMo sera détaillée dans l'exposé des modes de réalisation de l'invention.

Le mélangeage, le toronage, simple ou composé, ainsi que le tressage sont suffisamment connus de l'homme du métier pour ne pas être davantage décrits
10 ici.

Si l'enveloppe ductile inoxydable est un tube, l'insertion de l'assemblage « tressé » dans le tube inoxydable et ductile s'effectue à l'aide d'un autre fil, de traction, plus robuste, préalablement
15 introduit, et on fixe l'assemblage, par exemple par un crochet ou par soudure. Après fixation, de l'assemblage à ce fil de tirage, celui-ci est tiré de manière à faire rentrer l'assemblage dans le tube.

Si l'enveloppe est plane, il convient d'y
20 disposer plusieurs assemblages successifs, tous parallèles entre eux et rangées régulièrement les uns contre les autres, de manière la plus homogène possible. Puis la déformation mécanique est appliquée par tous moyens, en veillant à ne pas modifier
25 l'arrangement des assemblages successifs. Ces assemblages peuvent être rangés selon une ou plusieurs couches, du moment que l'homogénéité est conservée et que le combustible final respecte les contraintes de déformation et d'évacuation des produits de fission
30 gazeux.

Lorsque l'enveloppe ductile inoxydable est un tube, sa déformation mécanique après remplissage s'effectue soit par étirage à travers une filière à faible température (moins de 100°C) ou même à froid, selon l'épaisseur de ce tube. Mais la mise en forme préférentielle s'effectue par galetage, par passes successives, aboutissant à un combustible en crayons de section cruciforme. Cette mise en forme est détaillée plus amplement dans l'exposé des modes de réalisation de l'invention.

Lorsque l'enveloppe ductile inoxydable est de forme aplatie, sa déformation mécanique peut s'effectuer par pressage ou laminage. On peut ainsi envisager de retrouver une forme de combustible en plaques.

Les étapes de sectionnement et éventuellement de finitions spécifiques à chaque installation nucléaire utilisatrice sont connues de l'homme du métier et ne sont pas détaillées ici.

Pour conclure, il convient de mentionner les possibilités d'optimisation offertes par le procédé pour l'adapter aux différentes compositions possibles du matériau fissile et des éventuels éléments destinées à l'amélioration des transferts thermiques ou du comportement sous irradiation. Les diamètres des fils élémentaires peuvent être ajustés, le « tissage » peut présenter de nombreuses variantes, et le tassement des fils peut revêtir plusieurs modalités, avec divers pourcentages d'espaces vides.

BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages et particularités apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre, donnée à titre d'exemple non limitatif, accompagnée des dessins annexés parmi lesquels :

- la figure 1 représente une vue de côté d'une tresse selon l'invention montée dans une gaine,
- la figure 2 est une coupe selon l'axe XX de la figure 1,
- la figure 3 représente une vue en coupe selon l'axe XX de l'ensemble tresse et gaine lors de son passage sur un train de galets,
- la figure 4 représente une vue en coupe selon l'axe XX de l'ensemble tresse et gaine après sa mise en forme par galetage.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

On peut réaliser des fils d'UMo et les tresser tous ensemble. On peut également mélanger les fils d'UMo avec d'autres fils. Par exemple, si l'on veut améliorer la conductibilité du matériau, on peut mélanger les fils d'UMo avec des fils de cuivre. De même, si l'on désire diluer la charge en uranium du combustible, on tressera les fils d'UMo avec des fils de carbone et/ou de zirconium.

A titre d'exemple, on va réaliser une tresse combustible réalisée avec un fil uranifère d'UMo très homogène et des fils de cuivre en proportion décroissante, puis exclusivement avec des fils d'UMo.

Compte tenu des contraintes de sécurité liées à la mise en œuvre d'UMo, les premiers essais ont été réalisés à l'aide d'acier 304 dont les caractéristiques métallurgiques sont reconnues comme équivalentes. La réalisation en UMo, actuellement en cours, confirme cette équivalence. Pour ne pas alourdir la description ci-après, on ne mentionnera que l'UMo.

Tout d'abord, on commence par élaborer un fil d'UMo, dont le diamètre est compris entre 10 μm et 100 μm . L'élaboration des fils d'UMo peut être obtenue par le procédé du plateau tournant (voir le document [3]) optimisé pour les caractéristiques physiques propres à cet alliage. Ce procédé est basé sur la projection sur un disque tournant d'un jet d'alliage fondu. Par ce procédé, les fils ont un diamètre et une composition chimique contrôlée.

Pour préparer le fil d'alliage UMo, par exemple un alliage d'uranium à 8 % en poids de molybdène, l'uranium et l'élément d'alliage sont pesés et placés dans un creuset chauffé par un générateur haute fréquence. Lorsque la température est suffisamment élevée, on met la masse fluide de l'alliage UMo sous la forme d'un jet en fusion et on met en contact ce jet avec un fluide de trempe animé d'un mouvement de rotation centrifuge. La fusion est réalisée sous atmosphère de gaz inerte et le jet de métal ou d'alliage en fusion est entouré par une enveloppe de gaz inerte. Le gaz inerte peut être choisi parmi l'argon, l'azote, l'hélium et aura une pression comprise entre 1 et 15 bars. Le jet de métal ou d'alliage en fusion gainé par ce gaz passe par

l'orifice de l'enveloppe entourant le creuset, et le jet de métal ou d'alliage en fusion, toujours gainé de la sorte d'une enveloppe de gaz inerte, poursuit sa trajectoire généralement rectiligne jusqu'à ce qu'il
5 heurte le rideau de fluide de trempe, par exemple de l'eau en mouvement centrifuge rapide. La vitesse linéaire du fluide de trempe (ici l'eau) au point de contact peut être comprise entre 10 et 60 m/sec. Dans l'exemple présent, elle est de 40 m/sec. Au point de
10 contact, l'enveloppe de gaz inerte entourant le jet de métal ou d'alliage en fusion est déviée, tandis que seul le jet de métal ou d'alliage en fusion pénètre dans la masse d'eau et est atomisé et trempé rapidement, de préférence, à la vitesse déjà indiquée
15 plus haut.

De la même manière, on élabore 200 à 400 fils de 0,15 mm de diamètre, assemblés ensuite en un seul toron composé. Par exemple, cet assemblage comporte 216 fils élémentaires toronnés en 9 torons
20 simples (ou fuseaux), qui sont à nouveau toronnés entre eux sans toron central. Des expérimentations ont été réalisées notamment avec des pourcentages décroissants de fils de cuivre, puis avec la totalité des fils élémentaires en UMo.

25 Lorsque des fils de cuivre sont ajoutés, on réalise le mélange des composants. Pour cela, on réalise mécaniquement une tresse à partir du fil uranifère et des autres fils d'addition : on obtient une tresse mixte UX + Y avec X=Mo et Y=Cu.

30 Pour réaliser la tresse, on peut utiliser la méthode classique consistant à bobiner et à tisser

les fils à partir de plusieurs bobines en fonction de la forme que l'on souhaite donner à la tresse. On peut aussi par exemple torsader les fils tous ensemble dans le même sens. La tresse obtenue a un diamètre compris
5 entre 2 mm et 10 mm pour être introduite dans un tube de 5 mm de diamètre extérieur et d'épaisseur 0,15 mm. Sa densité est de l'ordre de 50%, c'est à dire que selon une section transversale de cette tresse, 50% de la surface de cette section serait constituée de fils,
10 le reste d'espaces vides, ce qui permet son introduction sans difficultés dans un tube de plus petit diamètre.

Par ailleurs, on fabrique un tube ductile et inoxydable de section circulaire qui va servir à
15 confiner la tresse : le tube va jouer le rôle de gaine. Il sera préférentiellement réalisé en inox 316 L ou 316 LN.

Puis on effectue le montage de la tresse 1 dans sa gaine 2 (voir figure 1) par tirage. On voit sur
20 la figure 2 qu'entre la tresse 1 et la gaine 2 est schématisé un jeu 3 nécessaire pour que la tresse puisse passer dans la gaine. En pratique, le diamètre du fil est plus grand que celui du tube, mais ce fil, peu dense (50% de fibres, 50% d'espaces vides), est
25 facilement compressible : le jeu 3 schématise cette compressibilité.

Enfin, on effectue la déformation mécanique, à faible température (inférieure à 100°C) ou à froid. Si l'on veut obtenir un combustible de forme
30 cruciforme, cette déformation peut être assurée par passages successifs sur un train de galets 4 dont le

profil est étudié pour atteindre la forme de croix souhaitée (voir figure 3). C'est ce qu'on appelle le galetage ou le co-galetage. On obtient ainsi un élément combustible 5 en « crayon » ayant une section cruciforme (voir figure 4).

On remarque que le jeu 3 se trouvant entre la tresse 1 et la gaine 2 est fonction de la déformation imposée à la gaine. Pour réaliser la mise en forme, on effectue des passages successifs du crayon combustible sur un train à galets à une température modérée. Une fois la déformation terminée, ledit jeu est nul et la tresse a une densité théorique comprise entre 80% et 90%, compte tenu des 10% de la surface d'une section occupée par les espaces vides, la densité théorique de 90% correspond au cas où la totalité des fils élémentaires est en UMo.

On notera que l'intensité de l'écrasement du crayon combustible lors de sa mise en forme est soigneusement dosé de manière à ce qu'il reste de légers espaces libres entre les différents fils de la tresse afin que les sous-produits de fission gazeux puissent être évacués. Dans ce but, on pourra par exemple faire en sorte que les fils, initialement de section cylindrique, soient déformés par compression et que les surfaces en contact de deux fils successifs se déforment en s'adaptant l'une à l'autre. De façon préférentielle, cette déformation est poursuivie jusqu'à l'obtention pour la majorité des fils d'une section quasi-polygonale, les parties sans contact avec un autre fil n'acquérant évidemment pas cette surface polygonale. Il produit un léger écrasement des fibres,

rendant leur section légèrement polygonale, ce qui améliore significativement les transferts thermiques. Plus précisément, on entend par légèrement polygonale le fait que deux surface convexes pressées l'une contre l'autre présentent localement des déformations tendant à les aplanir et à les adapter précisément l'une à l'autre.

La mise en forme du crayon combustible peut également être obtenue par étirage de l'ensemble « crayon combustible » au travers d'une filière de forme appropriée, le principe reposant sur l'hypothèse que les matériaux (gaine + tresse) traverse la filière sans glisser l'un par rapport à l'autre. On pourra ainsi réaliser selon l'invention des combustibles nucléaires cruciformes destinés à l'obtention de combustibles à forte densité en uranium (densité supérieure à 2 gU/cm^3). Dans ce cas, on utilisera plutôt le procédé de mise en forme classique de laminage à galets. On pourra également réaliser des combustibles de forme cylindrique destinés à l'obtention de combustibles dont la densité en uranium est supérieure à 10 gU/cm^3 . Dans ce cas, le procédé de mise en forme utilisé sera préférentiellement l'étirage, mais un laminage avec une forme appropriée peut aussi convenir.

BIBLIOGRAPHIE

- 5 [1] « Design of high density gamma-phase uranium,
 alloys for leu dispersion fuel applications », G.
 L. HOFMAN, M. K. MEYER, A. E. RAY, (1998).
- 10 [2] « Boron poisoning experiments at the PIK mock-
 up », livret publié par l'Académie des Sciences
 Russe, Institut de Physique Nucléaire de St
 Pétersbourg, preprint 2426, 2001.
- 15 [3] « Procédé de préparation de particules de métal ou
 d'alliage de métal nucléaire », demande de brevet
 FR-A-2 814 097 du 21/09/2000.

REVENDICATIONS

1. Combustible nucléaire à densité élevée de matière fissile, caractérisé en ce qu'il se présente
5 sous la forme d'un assemblage (1) de fils élémentaires, dont la majeure partie est constituée de matière fissile, lesdits fils étant assemblés par toronage, tressage ou tissage et ledit assemblage étant contenu dans un enveloppe inoxydable et ductile, ces fils
10 élémentaires étant comprimés par déformation de ladite enveloppe, et les fils élémentaires de matière fissile étant suffisamment fins pour permettre l'accommodation dimensionnelle du combustible aux effets de l'irradiation lors de la combustion nucléaire et
15 l'évacuation des produits de fission gazeux.

2. Combustible nucléaire selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la déformation de l'enveloppe est réalisée jusqu'à ce que
20 les espaces libres entre les fils élémentaires n'occupent que 3 à 15% de la section interne de l'enveloppe après déformation.

3. Combustible nucléaire selon l'une
25 quelconque des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que la déformation de l'enveloppe est réalisée de sorte que la section des fils élémentaires soit déformée, et que les sections de deux fibres successives s'adaptent l'une à l'autre.

4. Combustible nucléaire selon l'une quelconque des revendications 1, 2 ou 3, caractérisé en ce que la matière fissile est choisie parmi le groupe comprenant l'uranium, le plutonium, l'américium, leurs
5 alliages ou une association de plusieurs de ces éléments.

5. Combustible nucléaire selon la revendication précédente, caractérisé en ce que lesdits
10 alliages sont choisis parmi le groupe comprenant UMo et UAl.

6. Combustible nucléaire selon l'une quelconque des revendications 4 ou 5, caractérisé en ce
15 que la matière fissile est un alliage d'UMo comportant autour de 8% en masse de molybdène.

7. Combustible nucléaire selon la revendication 1, caractérisé en ce que les fils
20 élémentaires ont un diamètre compris entre 10µm et 100µm.

8. Combustible nucléaire selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'assemblage de
25 fils élémentaires (6) est composé uniquement de fils de même composition.

9. Combustible nucléaire selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'assemblage de
30 fils élémentaires (6) est composé de fils de compositions différentes.

10. Combustible nucléaire selon l'une
quelconque des revendications 8 ou 9, caractérisé en ce
que les fils (6) ont des diamètres identiques.

5

11. Combustible nucléaire selon l'une
quelconque des revendications 8 ou 9, caractérisé en ce
que les fils (6) ont des diamètres différents.

10

12. Combustible nucléaire selon l'une
quelconque des revendications 8 ou 9, caractérisé en ce
que l'assemblage (1) de fils élémentaires a la forme
d'une tresse.

15

13. Combustible nucléaire selon l'une
quelconque des revendications 8 ou 9, caractérisé en ce
que l'assemblage (1) de fils élémentaires a la forme
d'un toron.

20

14. Combustible nucléaire selon la
revendication précédente, caractérisé en ce que le
toron est un toron composé dépourvu de toron central.

25

15. Combustible nucléaire selon l'une
quelconque des revendications 8 ou 9, caractérisé en ce
que l'assemblage (1) de fils élémentaires est tissé.

30

16. Procédé de réalisation d'un combustible
nucléaire selon l'une quelconque des revendications 1 à
15, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

- réalisation de fils élémentaires (6) de composition déterminée, dont la majeure partie sont des fils de matière fissile,
- réalisation d'au moins un assemblage (1) à l'aide
5 desdits fils,
- placement de l'assemblage (1) dans une enveloppe (2) inoxydatable et ductile,
- mise en forme de ladite enveloppe remplie.

10 17. Procédé de réalisation d'un combustible nucléaire selon la revendication 16, dans lequel l'enveloppe est un tube, il n'y a qu'un seul assemblage et la mise en forme s'effectue par étirage à travers une filière ou par laminage.

15 18. Procédé de réalisation d'un combustible nucléaire conforme à la revendication 16, dans lequel l'enveloppe est un tube, il n'y a qu'un seul assemblage et la mise en forme s'effectue par galetage.

20 19. Procédé selon la revendication 16, caractérisé en ce que l'enveloppe est aplatie et contient plusieurs assemblages placés parallèlement les uns contre les autres de manière homogène, et la mise
25 en forme de cette enveloppe ainsi remplie s'effectue par pressage ou laminage.

1 / 2

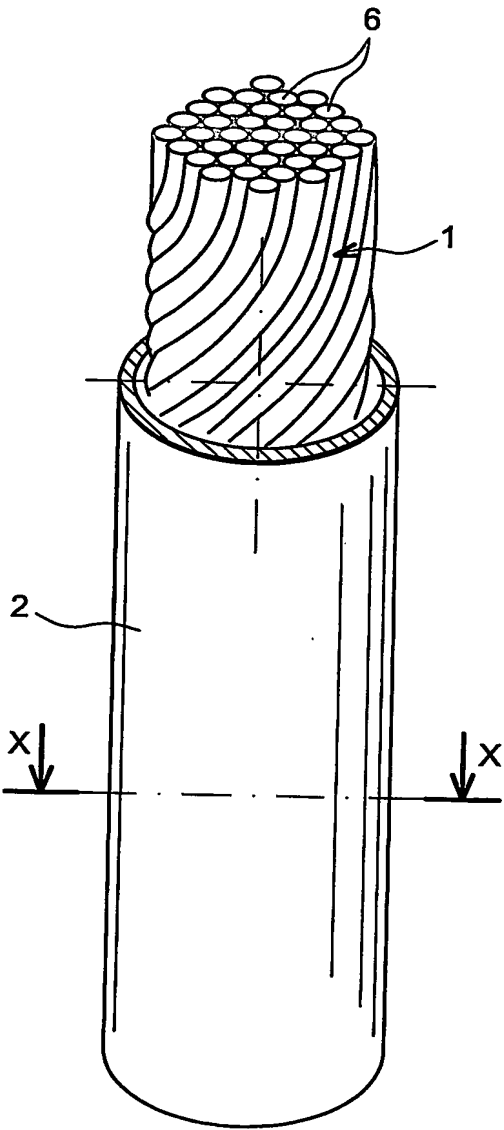


FIG. 1

2 / 2

FIG. 2

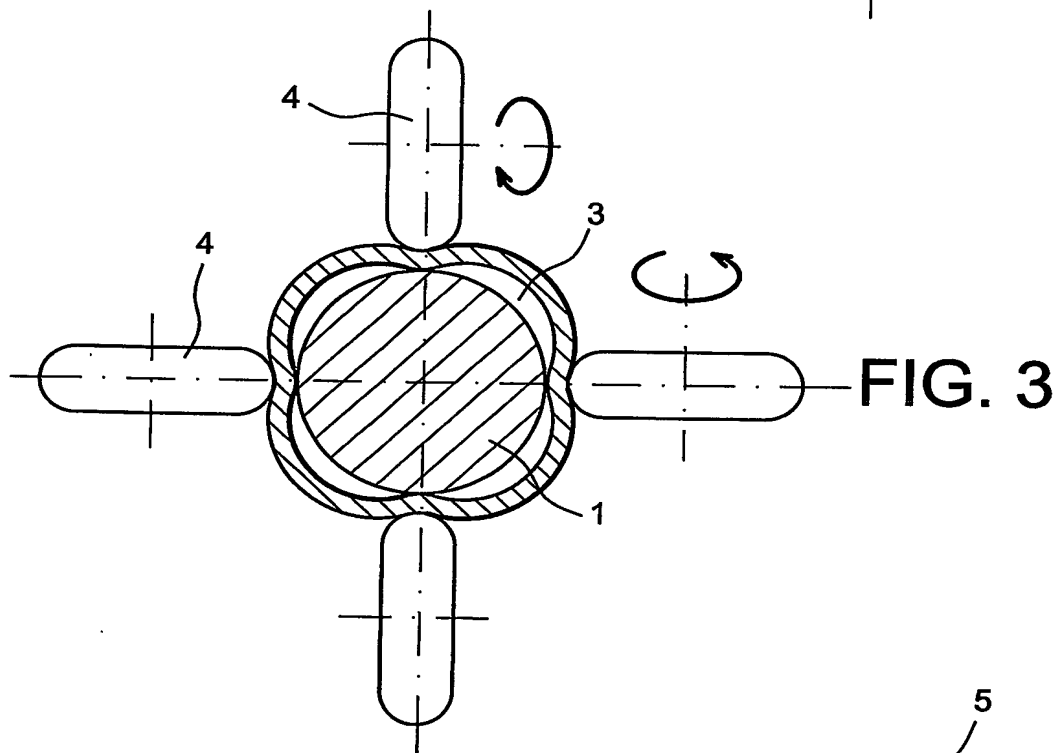
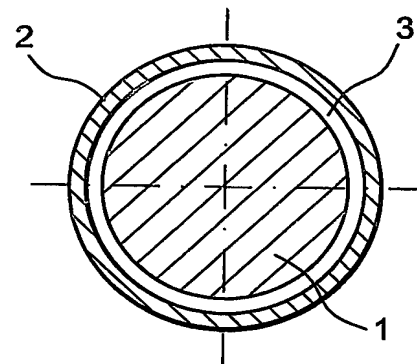


FIG. 3

FIG. 4

